

LP 21 : Bilan radiatif de la Terre

Sadek Al-Jibouri et Isabelle Safa

Niveau : L2

Prérequis

- Premier Principe
- Chaleur latente
- Flux
- Rayonnement Electromagnétique

Expériences

- ☕ Mesure par mesure de capacité

Références

Rayonnement thermique, bilan radiatif et effet de serre sur Planet-Terre.ENS-Lyon.fr

Table des matières

1	Rayonnement d'équilibre thermique	1
1.1	Interaction lumière-matière	1
1.2	Le corps noir	2
1.3	Objets réels	3
2	Température de la Terre	3
2.1	La Terre comme corps noir semi-réfléchissant	3
2.2	Terre avec atmosphère	4
2.3	Le cycle de l'eau	5

Introduction

Introduction scolaire : Nous avons déjà pu voir en cours des transferts d'énergie sous forme de conduction ou de convection. Ces transferts de chaleur demandent cependant un milieu matériel pour ce faire, ce qui n'est pas le cas dans le vide entre le Soleil et la Terre.

Nous allons donc voir aujourd'hui un autre type de transfert thermique, celui par rayonnement électromagnétique, qui est la façon dont le Soleil chauffe la surface de la Terre.

1 Rayonnement d'équilibre thermique

NB : C'était le nom de la leçon précédente quand il y avait encore des titres.

1.1 Interaction lumière-matière

On distingue sur la figure (1) quatre interactions Lumière - Matière, l'absorption apporte de l'énergie de la lumière vers la matière, l'émission de la matière vers la lumière et la réflexion et la diffusion ne font que

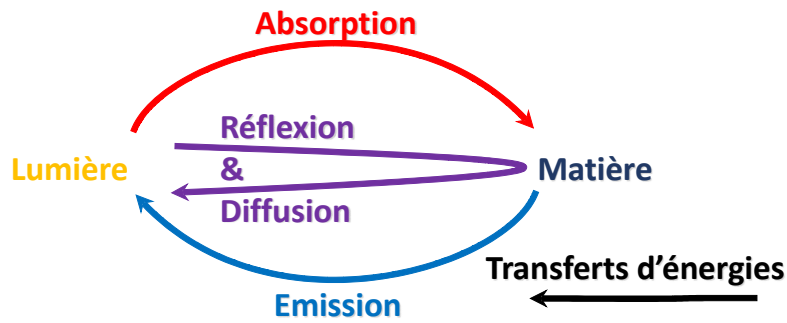


FIGURE 1 – Schéma pour les différentes interactions entre lumière et matière.

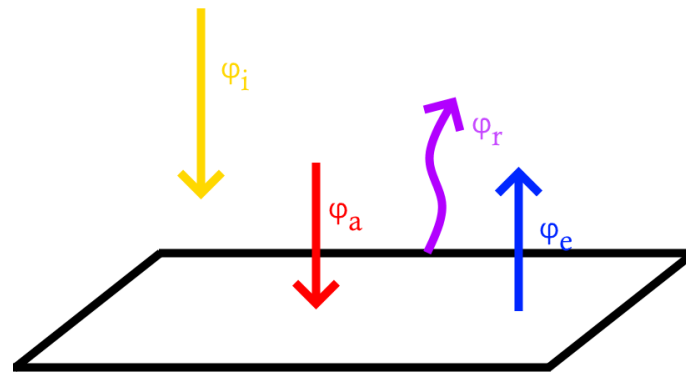


FIGURE 2 – Flux arrivant et partant d'une surface. J'ai pris la convention qu'un flux arrivant et touchant une surface est absorbé, et émis/réfléchi s'il quitte la surface.

des changements de directions dans la lumière. Pour une surface, on ne considérera pas de diffusion, et on ne parlera que d'absorption et de réflexion.

On introduit alors l'idée de bilan radiatif : on va compter les différents flux arrivant et partant d'une surface, on dit qu'on est à l'**équilibre radiatif** quand tout le flux partant est égal au flux incident.

On utilise la notion de flux d'énergie, qui correspond à une puissance surfacique (W.m^{-2}), c'est donc globalement de la norme du vecteur de Poynting dont on parle ici.

On introduit quatre flux, φ_i le flux incident, φ_a le flux absorbé, φ_r le flux réfléchi, φ_e le flux émis.

Bilan radiatif : $\varphi_{\text{partant}} = \varphi_e + \varphi_r$, $\varphi_{\text{incident}} = \varphi_i = \varphi_e + \varphi_r$

Définition : Équilibre radiatif

$$\varphi_{\text{partant}} = \varphi_{\text{incident}} \Leftrightarrow \varphi_a = \varphi_e$$

1.2 Le corps noir

Définition : Corps noir

Objet théorique idéal, qui absorbe tout le rayonnement électromagnétique qu'il reçoit, et le réémet sous forme de *rayonnement thermique*.

u_{em} : la densité d'énergie électromagnétique, celle qu'on retrouve dans le théorème de Poynting (équation de conservation de l'énergie électromagnétique).

Loi de Planck (1900) :

On l'obtient avec un traitement statistique sur un gaz parfait de photons (à l'époque, le photon n'était pas encore défini et Planck a fait son traitement sur des quantas d'énergie EM $h\nu$). Elle relie la température

du corps avec ses densités spectrales énergétiques en terme de fréquence et de longueur d'onde.

$$u_\nu(\nu, T) = \frac{\partial u_{em}}{\partial \nu} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left\{\frac{h\nu}{k_B T}\right\} - 1}$$

Et par un changement de variable :

$$u_\lambda(\lambda, T) = \frac{\partial u_{em}}{\partial \lambda} = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left\{\frac{hc}{\lambda k_B T}\right\} - 1}$$

Loi de Wien Se déduit de la loi de Planck par dérivation par rapport à λ de u_λ .

$$\lambda_{max} \cdot T = 2898 \mu\text{m K}$$

Pour le Soleil : $\lambda_{max}^T = 0,48 \mu\text{m}$, $T_S = 5778 \text{ K}$

Pour la Terre : $\lambda_{max}^S = 10 \mu\text{m}$, $T_T = 288 \text{ K}$.

Loi de Stefan

Se déduit de la loi de Planck en intégrant $L_\lambda(\lambda, T) = u_\lambda(\lambda, T) \cdot c/4$ par rapport à λ .

$$\varphi_e = \sigma T^4$$

où $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ est la *constante de Stefan*.

1.3 Objets réels

On définit, pour ces objets :

Définition : L'émissivité globale

$$\epsilon(T) = \frac{\varphi_e}{\sigma T^4} \in [0, 1]$$

On définit aussi l'émissivité à une longueur d'onde donnée, qu'on intègre pour avoir l'émissivité globale.

L'émissivité du corps noir est de 1 partout, et inférieure pour un corps dit *gris*.

Définition : L'albédo

$$A = \frac{\varphi_r}{\varphi_i} \in [0, 1]$$

Pareil pour l'albédo, on peut définir une absorptivité qui dépend de la longueur d'onde. Dans la suite, on utilise l'absorptivité intégrée sur le visible et sur l'infrarouge qu'on nomme albédo dans le visible et l'IR. Mais il s'agit en réalité de l'albédo tronqué sur deux domaines d'intérêts.

OdG : $A^T(\text{visible}) = 0,3 = A$ et $A^T(\text{IR}) = 0$.

2 Température de la Terre

2.1 La Terre comme corps noir semi-réfléchissant

On suppose que la Terre ne reçoit de l'énergie uniquement de la part du Soleil et en réfléchit 30% car son rayonnement est dans le visible.

Si suffisamment de temps : retrouver Φ_S à partir de la loi du corps noir sur le Soleil plutôt qu'utiliser directement la valeur.

$\Phi_S = 1368 \text{ W.m}^{-2}$ sur une section efficace $s_{eff}^T = \pi R_T^2$, réparti sur la surface totale de la Terre $S_T = 4\pi R_T^2$. Finalement $\varphi_S = \frac{\Phi_S}{4} = 342 \text{ W.m}^{-2}$ est le flux incident arrivant sur Terre. Elle en absorbe $(1 - A)\varphi_S$

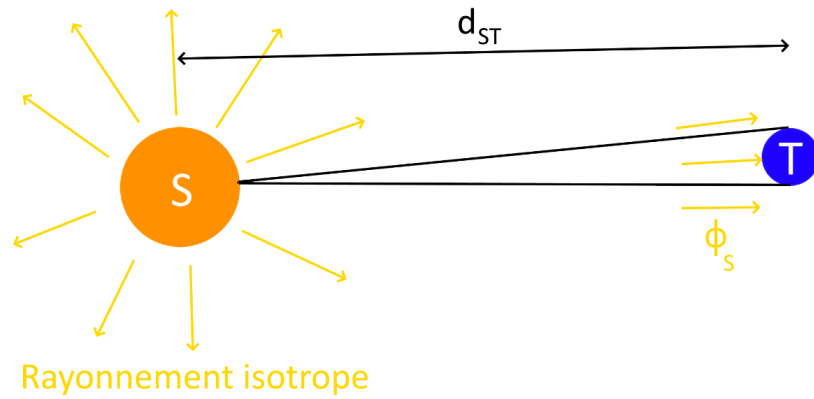


FIGURE 3 – Arrivée du rayonnement thermique du Soleil sur la Terre.

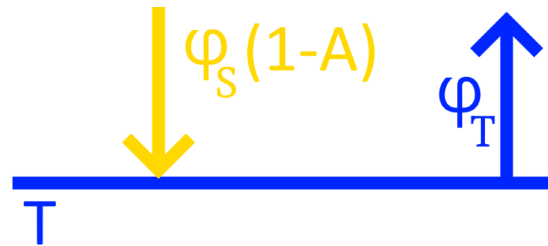


FIGURE 4 – Flux pour l'équilibre {Rayons du Soleil - Terre}

et réémet φ_T (schéma), d'où $\varphi_T = (1 - A)\varphi_S = \sigma T_T^4$ d'après la loi de Stefan, en la considérant comme un corps noir. On trouve finalement $T_T = 255\text{K} = -18^\circ\text{C}$.

C'est très froid : plus tôt, on avait donné comme OdG 288 K en observant le spectre de la Terre. Améliorons le modèle :

2.2 Terre avec atmosphère

On considère l'atmosphère comme une couette autour de la Terre, qui absorbe 90% des rayonnements dans l'IR (coefficient d'absorption $b = 0,9$ dans l'IR), n'absorbe rien dans le visible (c'est à dire ce qui arrive directement sur Terre).

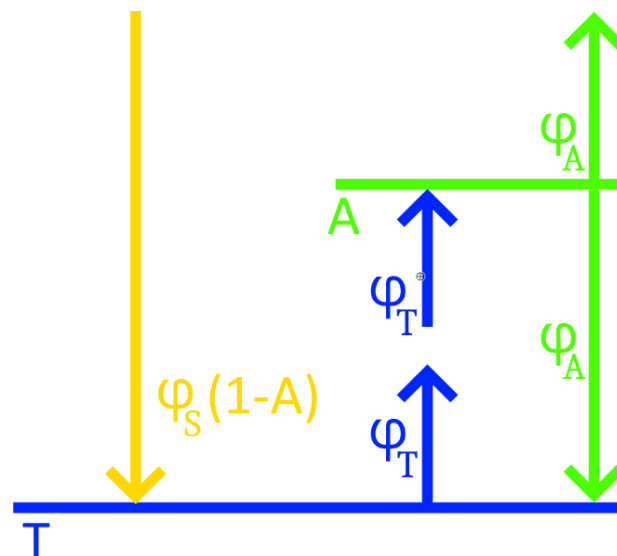


FIGURE 5 – Flux pour l'équilibre {Rayons du Soleil - Terre - Atmosphère}

En considérant l'atmosphère et la Terre comme deux corps noirs on effectue deux bilans radiatifs :

$$2\varphi_A = b\varphi_T$$

$$\varphi_T = \varphi_A + (1 - A)\varphi_S$$

d'où $\varphi_T = \frac{2(1-A)\varphi_S}{2-b}$.

Avec la loi de Stefan, ce nouveau flux émis nous donne $T_T = 296\text{K}$, soit 23°C . C'est beaucoup plus satisfaisant comme résultat, juste un peu trop chaud.

2.3 Le cycle de l'eau

On propose de rajouter un troisième paramètre en compte pour modéliser la température de la Terre : l'énergie fournie à une partie de l'eau présente sur Terre pour s'évaporer, puis transmise à l'atmosphère pour se recondenser en nuages. On l'appelle φ_O , le *flux de chaleur latente*.

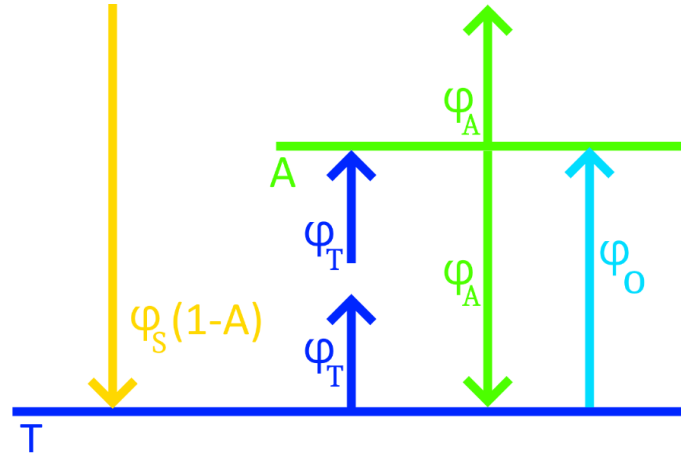


FIGURE 6 – Flux pour l'équilibre {Rayons du Soleil - Terre - Atmosphère en comptant le flux de chaleur latente}

Les bilans de flux deviennent alors :

$$2\varphi_A = \varphi_O + b\varphi_T$$

$$\varphi_O + \varphi_T = \varphi_A + (1 - A)\varphi_S$$

Si on implémente la température effective de la Terre, 288 K , on trouve que $\varphi_O = 2\varphi_S(1 - A) - \varphi_T(2 - b) = 49,71\text{W.m}^{-2} = L_V D$ où $L_V = 2260\text{kJ.kg}^{-1}$ est la chaleur latente de vaporisation de l'eau et D un débit surfacique (d'eau qui s'évapore), ceci nous donne un débit d'eau évaporée de $D = 2,2 \times 10^{-5}\text{ kg m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ soit par ans, $D = 693,7\text{ kg m}^{-2}\text{ an}^{-1}$.

Si l'on considère que toute l'eau évaporée retombe sous forme de pluie, on peut convertir le débit d'eau évaporée en mm de pluie par an avec le rapport 1 : 1 entre les unités utilisées : $D = 693,7\text{ mm an}^{-1}$

En comparaison, en France, on a en moyenne des pluies de 600 mm an^{-1} et la moyenne sur l'ensemble des continents est de 750 mm an^{-1} . On retrouve donc un résultat proche de la réalité avec un modèle simple.

Conclusion

A l'aide des bilans radiatifs et des propriétés respectives du Soleil, de la Terre et de l'atmosphère terrestre, nous arrivons à remonter à des résultats pertinents et à modéliser comment fonctionne globalement le réchauffement de la Terre par rayonnement. En utilisant des modèles plus poussés, par exemple pour modéliser plus précisément l'absorption et la diffusion des rayonnements dans l'atmosphère, il est même possible d'avoir une idée de comment l'évolution dans les quantités de gaz à effet de serre durant les deux derniers siècles peut impacter la température terrestre.

Autre idée d'ouverture : Résultats intéressants surtout vis-à-vis des origines de la théorie du corps noir, qui utilisait des hypothèses sans preuves à l'époque, comme la quantification de l'énergie EM. L'observation des phénomènes confirmant ces hypothèses a mené au développement de la mécanique quantique, discipline désormais fondamentale.

Questions

- **Tu nous parles de la loi de Planck. Comment la redémontrer ?** Thermodynamique statistique quantique. Idée : prendre un potentiel chimique égal à 0 car nombre de photons non conservatif. On considère un gaz de photons dans une enceinte fermée. On fait un traitement dans une boîte cubique, et décompter les états accessibles : 2 états de polarisation possibles, densité d'états, hop.
- **D'où vient l'exponentielle ?** Statistique de Bose-Einstein.
- **Quelle est la loi qui relie ω et λ qui te permet de passer de u_ν à u_λ ?** $\nu = \frac{c}{\lambda}$
- **Limites basse et haute fréquence de la loi de Planck ?** Resp : loi de Rayleigh-Jeans (modèle pour les grandes longueurs d'ondes, diverge pour les petites longueurs d'ondes, ce qui donne la catastrophe ultra-violette) ; loi de Wien (pour les petites longueurs d'ondes).
- **Quel est le "meilleur" corps noir qu'on connaisse ?** L'espace, rayonnement de fond diffus cosmologique, très froid.
- **Unité constante de Stefan ?** $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$. Attention à ne pas faire d'erreurs sur les unités, il y en a peu dans la leçon donc chaque unité compte.
- **Lien entre flux à la fréquence ν et densité spectrale ?** Luminance $L_\nu(\nu) = \frac{c}{4} u_\nu(\nu)$
- **Que représente la luminance ?** Quantité d'énergie qui traverse une certaine surface de taille arbitraire.
- **Tu ne considères pas la diffusion. Mais il se passe quoi dans l'atmosphère ?** Pour moi, plus clair de parler de réflexion tout le temps. Dans l'atmosphère, les petites longueurs d'onde de la lumière du soleil vont être plus diffusées que les autres, c'est pour ça qu'on a le ciel bleu.
- **Quelle couleur, la longueur d'onde principale pour le soleil ?** Le vert (d'où le *rayon vert* des couchés de Soleil).
- **Emissivité dépend de λ , pourtant la loi de Stefan est intégrée sur λ .** En effet, erreur lors du passage, j'ai mélangé les grandeurs intégrées sur λ et les grandeurs dépendant de la longueur d'onde.
- **visible ?** 400-800nm.
- **Gaz à effet de serre ?** Eau, CO_2 (SF_6).
- **À quoi ressemble le spectre de la Terre si on enlève l'atmosphère ?** Avec atmosphère, bandes d'absorption dans l'IR à cause des gaz à effet de serre. Sans, ça se superpose assez bien au corps noir à 288 K.
- **Autres échanges d'énergie qu'il faudrait rajouter dans le cycle de l'eau ?** Conduction, convection. Si on les prend pas en compte, on obtient une température absurde pour l'atmosphère (trop froide).
- **Quoi d'autre comme sources thermiques ?** Géothermie, causée par des réactions nucléaires en profondeur (radioactivité).
- **A quelle proportion contribue le Soleil dans la température à la surface de la Terre par rapport à la géothermie ?** Au-dessus de 99,9%. Les désintégrations nucléaires en profondeur.

- **Quelle puissance on trouve pour le Soleil dans le modèle du corps noir ?** $\Phi_S = \frac{\text{puissance}}{4\pi d_{ST}^2} = \frac{S^S \sigma T_S^4}{4\pi d_{ST}^2}$
- **D'où vient l'énergie du Soleil ?** Fusion d'atomes légers ($< \text{Fe}$), surtout H et He.
- **La valeur de l'albédo que tu prends pour la Terre, c'est une valeur moyenne. T'as une idée des différences en fonction du type de surface ?** En réalité, ce sont les nuages qui contribuent le plus : pour 2/3 de l'albédo, et sinon les pôles (très blanc), et un petit peu les océans puisqu'ils occupent la majeure partie de la surface mais ils sont peu réfléchissants comparés aux nuages et calottes glacières.
- **Différence entre coefficient d'émissivité et l'émittance ?** L'une est intégrée sur toutes les longueurs d'onde (émissivité), tandis que l'autre est définie à chaque longueur d'onde (émittance).
- **Température du Soleil ?** C'est la température de surface que j'ai donnée. En profondeur, 15 millions de degrés.

Commentaires

- Bien la contextualisation en intro, bonne présentation du tableau.
- Deux versions de la loi de Planck : dire comment tu passes de l'un à l'autre.
- Le cycle de l'eau a plu, original. Mentionner quand même à la fin les éventuels défauts du modèle (température de l'atmosphère...)
- À quoi ça sert de considérer que le soleil est un corps noir si on s'en sert pas pour le flux reçu par la Terre ? Quitte à montrer un spectre, autant le montrer pour la Terre, qui est ce qu'on considère comme corps noir. Ou alors : faire le calcul pour avoir le flux émis en tant que corps noir (donc pas utiliser la donnée expérimentale).
- On sentait que c'était la panique à la fin. On peut faire des slides (évolutives) pour les schémas.
- Si tu veux le placer en L3, tu peux faire les calculs de phy stat.
- Le plan est classique mais intéressant.
- Fais attention à tes unités.
- Toujours revenir aux AN dans ce type de leçons.
- Construction progressive des schémas : bien (ajout des flèches pour le flux de chaleur latente sur le schéma original pour le bilan radiatif avec l'atmosphère).
- Fais attention à bien écrire *au moins le plan...*
- Mettre en regard le spectre du soleil vu depuis la Terre et depuis l'espace permet de faire le lien avec d'autres leçons ; on peut notamment voir les bandes d'absorption des différents éléments.
- Prends confiance en toi pour les réponses aux questions !
- C'était une bonne leçon.